

# Les méthodes et outils de diagnostic et de contrôle appliqués pour la maintenance et la maîtrise des risques

-

## Application de la Thermographie infrarouge au diagnostic

Vincent Leemans,  
Unité de Mécanique et Construction,  
Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux  
2 Passage des Déportés , 5030 Gembloux (Belgique)  
leemans.v@fsagx.ac.be

### 1. Introduction

La thermographie vise la mesure de la température de la surface d'un corps, sans contact. Le résultat est une mesure bi-dimensionnelle, une carte, similaire à une image. La différence majeure par rapport à une image est que le rayonnement acquis par la caméra est en grande partie émis par la surface observée (et non réfléchis) et peut, moyennant étalonnage, être convertis en mesure de température.

L'exposé comporte quatre parties. La première donne les bases des transferts thermiques, la deuxième présente l'acquisition d'un thermogramme, dont le traitement et l'analyse sont discutés dans la troisième partie. La présentation des applications possibles termine l'exposé.

### 2. Transfert thermique

La température est la mesure de la sensation de chaud et de froid. Au niveau microscopique, c'est une mesure de l'énergie cinétique des particules (molécules, atomes et électrons). Au niveau macroscopique elle détermine les transferts de chaleur. Il existe un zéro absolu correspondant à l'absence de mouvements ou à une pression nulle pour les gaz.

La chaleur est l'énergie transférée d'un corps à un autre, suite à une différence de température. Il existe plusieurs voies de transfert possibles. Le point 2.1 donne un aperçu de la conduction et de la convection alors que le point 2.2 détaille le rayonnement.

#### 2.1. Modes de transferts

La conduction est liée à la propagation dans la matière, par transfert d'énergie cinétique entre particules.

La conduction est régie par l'équation 1 :

$$Q = -k A \frac{\delta T}{\delta x} \quad 1$$

où  $Q$  est la quantité de chaleur,  $k$  le coefficient de conduction, lié à la conductivité thermique et l'épaisseur,  $A$  l'aire de la section par laquelle le transfert s'opère,  $\delta T / \delta x$  est le gradient de température. Le transfert est inversement proportionnel au gradient de température et directement

proportionnel à l'aire de contact. Un système d'équations semblables à (1) peut être écrit pour chacune des trois directions de l'espace. La chaleur transférée augmente la température du corps suivant l'équation 2 :

$$\Delta Q = m C \Delta T \quad 2$$

où  $m$  est la masse,  $C$  la capacité thermique massique (ou chaleur spécifique) du matériau et  $\Delta T$  l'augmentation de température.

Ces équations sont à la base des calculs de transfert thermique qui nécessitent la modélisation de chaque cas particulier.

La convection, mode de transfert principal dans les fluides, est constituée par le déplacement de matière (des molécules), sans changement d'état, à cause des différences de densité. La quantité de chaleur transportée est donnée par l'équation 2.

## 2.2. Rayonnement

Le rayonnement électromagnétique (ci-après dénommé rayonnement) est l'émission de photons par la matière à une température supérieure au zéro absolu. C'est ce mode de transfert qui est utilisé en thermographie. Un rayonnement électromagnétique est caractérisé, par sa longueur d'onde  $\lambda$  et sa fréquence  $\nu$ . Ces deux paramètres sont reliés par :

$$c = \lambda \nu \quad 3$$

avec  $c$  (*celeritas*) la vitesse de la lumière.

L'énergie  $E$  contenue dans chaque photon est donnée par :

$$E = h \nu \quad 4$$

avec  $h$  la constante de Planck. Le spectre électromagnétique (la décomposition du rayonnement en fréquences) couvre des longueurs d'onde les plus courtes (fréquences les plus élevées, donc rayonnement plus énergétique) vers les plus longues, les rayonnements  $\gamma$ , X, ultraviolets (UV), visibles, infra-rouges, radar, et radio (Fig. 1). Les longueurs d'ondes utilisées en thermographie vont depuis environ 0,1  $\mu\text{m}$  dans l'ultra-violet jusqu'à 15  $\mu\text{m}$  dans l'infra-rouge (et donc couvrent tout le spectre du visible). Le plus généralement, c'est la bande de 2 à 15  $\mu\text{m}$  qui est utilisée (d'où l'appellation thermographie infrarouge).

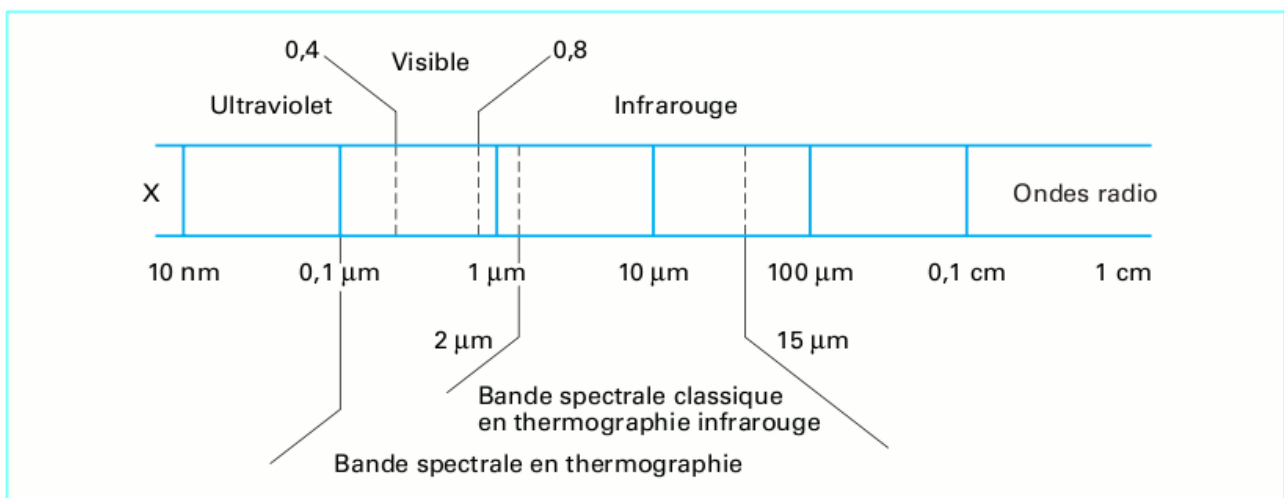


Figure 1 : Partie du spectre électromagnétique utilisé en thermographie.

Le flux énergétique est l'énergie émise ou reçue par une surface quelconque (par rayonnement). Par surface, il faut entendre la surface d'un corps que l'on observe ou la partie de la lentille de la caméra qui reçoit le rayonnement, etc. Cette surface émet dans (ou reçoit d') une hémisphère et, d'une façon générale, potentiellement dans tout le spectre. Pour l'acquisition d'un thermogramme, des considérations géométriques entrent en compte. La luminance électromagnétique  $L$  est le flux émis (ou reçu, Fig. 2) par un élément de surface  $dS$  donné (en particulier, la surface observée par un pixel de la caméra), dans une direction faisant un angle  $\theta$  avec la normale à la surface, dans un angle solide  $d\Omega$ . (défini en l'occurrence par l'aire de l'objectif et la distance objectif-objet). La luminance électromagnétique spectrique (par élément de spectre)  $L_\lambda$  est donnée par :

$$L_\lambda = \frac{d^5 \phi}{(dS \cos \theta) d\Omega d\lambda} \quad 5$$

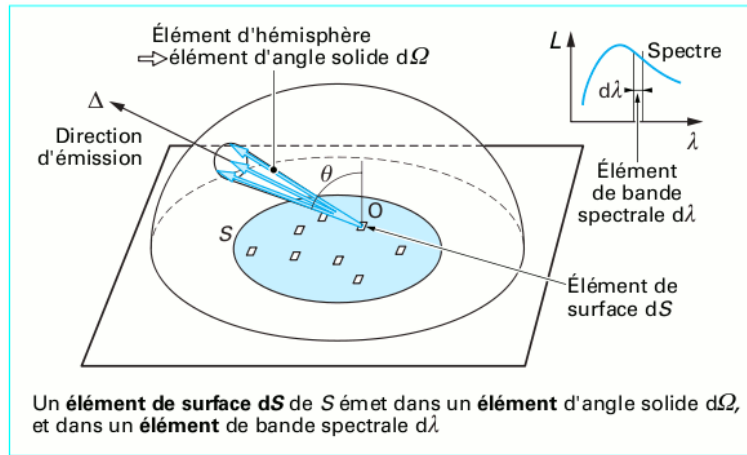


Figure 2 : Définition de la luminance (spectrique).

Le rayonnement interagit avec la matière de trois façons (Fig. 3), par absorption, réflexion ou transmission. La réflexion peut être diffuse ou spéculaire (comme pour un miroir); la transmission peut être diffuse ou diffractée. Pour un élément de surface donné, la somme des rayonnements absorbés, réfléchis ou transmis est égale au rayonnement incident :

$$\phi = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad 6$$

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad 7$$

avec  $\rho$  le facteur de réflexion,  $\alpha$  le facteur d'absorption et  $\tau$  le facteur de transmission. De plus, le corps en question n'étant pas à la température du zéro absolu, il rayonne et pour un corps à l'équilibre thermodynamique, la quantité absorbée est égale à la quantité émise (Eq. 8; loi de Kirchhoff). Le facteur d'absorption est donc égal à l'émissivité. Cette relation reste valable pour chaque longueur d'onde :

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad 8$$

Différents modèles servent à décrire la réalité des objets observés et leurs propriétés sont résumées dans le tableau 1. Le corps transparent, le miroir parfait et le corps noir ont chacun un des facteurs égal à l'unité et forcément les autres nuls. En conséquence, ni le miroir, ni le corps totalement transparent ne peuvent absorber ni émettre de rayonnement (l'émissivité est égale au facteur d'absorption). En pratique, les corps proches de ces modèles ont des valeurs proches de l'unité ou proche de zéro. L'air, très transparent pour le rayonnement visible, absorbe (et émet) de façon

variable en fonction de la longueur d'onde, comme montré à la Fig. 4. Sur cette figure, deux régions utilisées pour les mesures thermographiques sont mises en évidence, la première, marquée SW pour *short waves*, ondes courtes (2-5  $\mu\text{m}$ ), la seconde marquée LW pour *long waves*, ondes longues (8-14  $\mu\text{m}$ ). La région des ondes courtes comprenant une bande d'absorption de l'eau est susceptible de mettre en évidence la vapeur d'eau dans l'air. Pour les corps de type miroir (métaux polis), c'est, comme en vision classique, l'environnement qui est observé et non le corps lui-même.

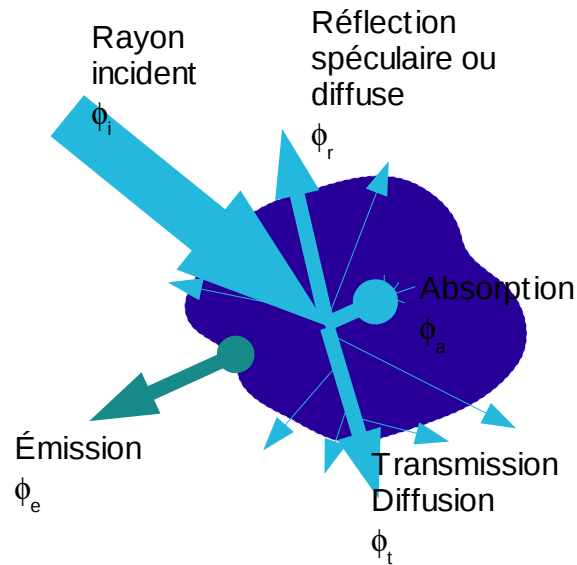


Figure 3 : Interaction d'un rayonnement avec la matière.

Tableau 1 : Propriétés des principaux modèles de corps.

Corps	$\rho$	$\alpha = \varepsilon$	$\tau$
Transparent	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 1$
Noir	$\approx 0$	$\approx 1$	$\approx 0$
Gris (opaque)	$\rho + \alpha = \rho + \varepsilon = 1$		$\approx 0$
Miroir parfait	$\approx 1$	$\approx 0$	$\approx 0$

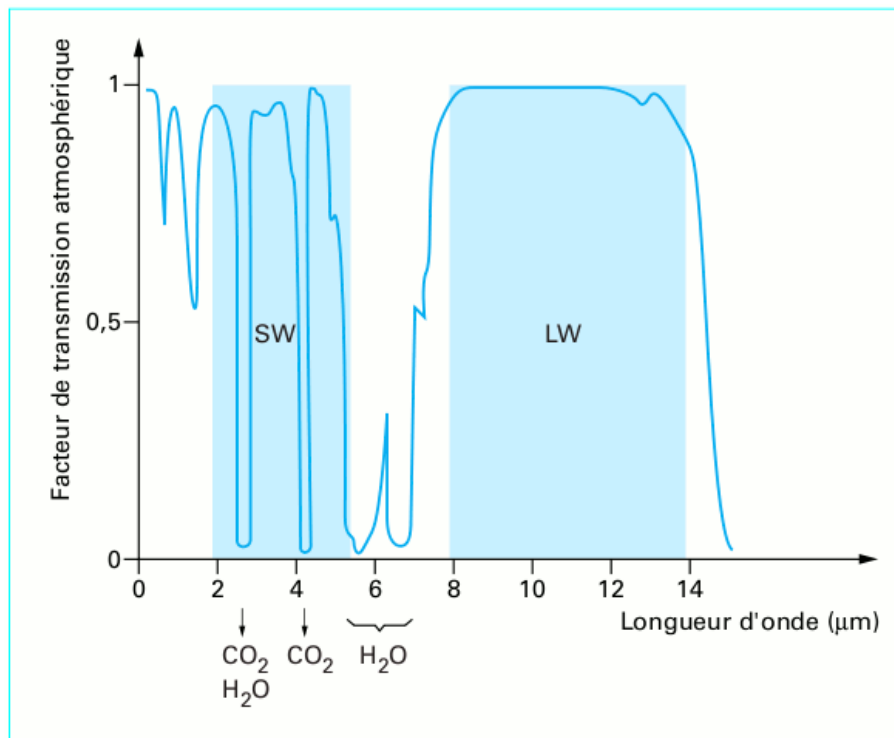


Figure 4 : Facteur de transmission, pour l'air, en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

Le corps noir a la propriété d'absorber totalement toute longueur d'onde. Pour ce corps, la loi de Planck définit l'émission (la luminance  $L$ ) en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  et de la température  $T$  :

$$L_{(\lambda,T)} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

9

avec  $k$  la constante de Boltzman. La Fig. 5 en donne une représentation. La courbe en pointillé reliant les maxima est la loi de Wiem tandis que l'aire sous la courbe est donnée par la loi de Stefan-Boltzman.

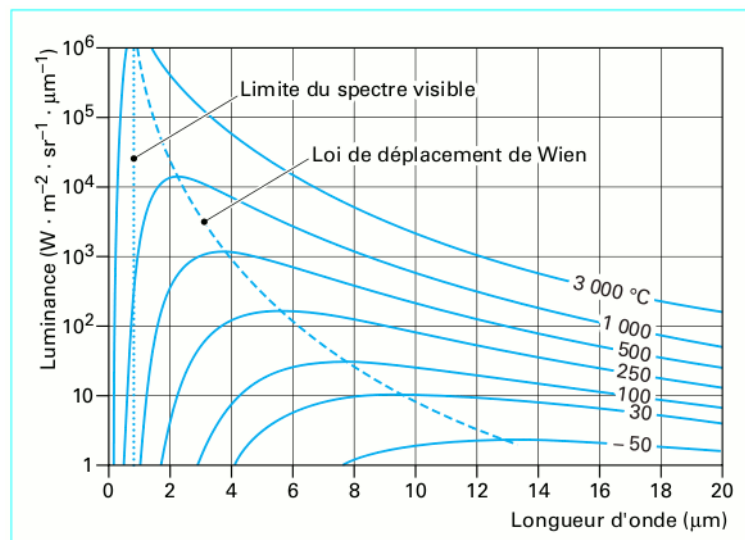


Figure 5 : Luminance émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de la

température (loi de Planck).

La loi de Planck permet de relier la quantité d'énergie reçue par le capteur à la température du matériau. Les corps opaques ordinaires ou corps « gris » ont un facteur d'absorption et une émissivité qui ne sont ni nulles ni proche de l'unité. La connaissance de ce paramètre est très importante pour la mesure de la température, puisque c'est via la quantité de rayonnement émis que l'on peut connaître la température du corps. Ce paramètre doit absolument être connu. Il varie dans des proportions importantes et le Tableau 2 donne quelques valeurs. Les métaux polis ont une émissivité très basse, mais les matières grasses et surtout l'oxydation modifient fortement cette valeur. Les matériaux usuels, comme la terre, le béton, le plâtre, ont des émissivités entre 0,9 et 0,95. Les peintures et vernis ont aussi des émissivités importantes, ce qui est très utile dans la mesure où beaucoup d'éléments mécaniques sont peints.

Tableau 2 : Emissivité de quelques matériaux.

Matière	Émissivité
Or poli	0,02
Acier poli	0,07
Acier oxydé	0,85
Nickel	0,05
Nickel avec un film d'huile de 50 µm	0,46
Vernis blanc	0,92
Vernis noir	0,97
béton	0,92
Peau humaine	0,98
graphite	0,98

La température peut donc être déterminée grâce à la loi de Planck (Eq. 9) et aux deux relations suivantes :

$$d^5\phi = L_\lambda (dS \cos \theta) (dR \cos \theta') d\lambda / D^2 \quad 10$$

$$L_\lambda = (L_{S_\lambda} \varepsilon_\lambda + L_{env_\lambda} \rho_\lambda) \tau_{atm_\lambda} + L_{atm_\lambda} \varepsilon_{atm_\lambda} \quad 11$$

En plus de l'émissivité du corps étudié, il faut connaître la température environnante et celle de l'air pour calculer la luminance environnante  $L_{env_\lambda}$  et celle de de l'air  $L_{atm_\lambda}$ . Ces paramètres constituent les grandeurs d'influences. Si l'épaisseur d'air est peu importante, moins de deux mètres pour les ondes courtes, moins de dix mètres pour les ondes longues, il est possible de négliger les facteurs atmosphériques.

## 3. Acquisition

### 3.1. Capteurs

Il existe deux types de capteurs, quantiques ou pyroélectriques. Les capteurs quantiques sont des semi-conducteurs qui exploitent surtout l'effet photovoltaïque. Les photons incidents qui ont une énergie suffisante (Eq. 4) sont absorbés par les électrons qui passent ainsi de la bande de valence à la bande de conduction. Le temps de réponse de ces capteurs est donc très court et est déterminé

par le temps d'intégration nécessaire pour accumuler suffisamment d'électrons pour pouvoir les compter. En-dessous d'une énergie donnée, ces capteurs ne répondent plus. Le nombre d'électrons « thermiques » (électrons qui passent à l'état excité à cause de l'agitation thermique) qui constitue un bruit augmente avec la température. Ces capteurs ont donc une plage optimale de fonctionnement, comme illustré à la Fig. 6. Il est souvent nécessaire de les refroidir.

Parmi les composés, l'Antimoniure d'Indium fournit des capteurs très stables, à sensibilité constante et d'une très grande dynamique, possédant un haut rendement quantique et semble être le meilleur détecteur pour les ondes courtes. Il a une température de fonctionnement de 70 K.

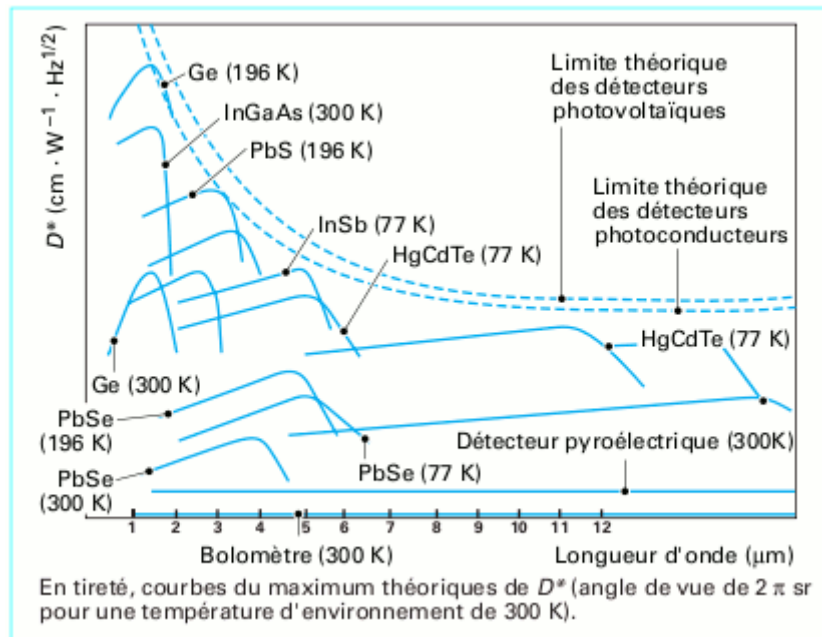


Figure 6 : Détectivité spécifique des détecteurs.

Les détecteurs thermiques sont basés sur une modification de la capacité (pyroélectriques) ou de la résistance (bolomètres) des composants en fonction de la température. Ces derniers doivent donc être « échauffés » pour que la lecture puisse avoir lieu et ont un temps de réponse plus long (environ 5ms, ce qui est en général suffisant). Ils n'ont par contre pas de sélectivité spectrale et sont utilisables à température ambiante (bien qu'ils possèdent une meilleure détectivité s'ils sont refroidis). Les micro-bolomètres existent en matrice et permettent une lecture à 25 trames par secondes.

D'un point de vue géométrique, les premières caméras possédaient un seul capteur et un système optique permettait le balayage de l'image dans les deux directions. Pour les capteurs à barrette, un seul balayage est nécessaire alors que pour les capteurs matriciels l'optique est fixe. Ces capteurs ont un nombre de pixels plus faible que leurs homologues utilisés dans le visible.

### 3.2. Optique

Il n'y a pas de différence fondamentale entre l'optique en thermographie et en visible. Les mêmes théories restent valables. Les lois de la réflexion, de la réfraction, des lentilles, la distance focale, l'ouverture ou l'ouverture relative sont des notions applicables dans le domaine de la thermographie. Puisqu'il s'agit de caméras de mesure et contrairement à leurs homologues opérant dans le visible, il n'y a pas d'iris, (l'iris rendrait vain toute tentative d'étalonnage). Pour la même raison, il n'y a pas de contrôle automatique du gain. Tant que la résolution spatiale des capteurs reste relativement faible, les principaux défauts optiques sont d'une importance relative. Par contre le vignettage, provoqué par l'obturation partielle du faisceau aboutissant à certaines régions du détecteur et créant une non-uniformité est à contrôler avec la plus grande attention.

### 3.3. Caméras

Il est possible de distinguer trois catégories de caméras (par ordre de qualité et de prix croissants) : les « imageurs », les caméras de maintenance et les caméras de mesure ou de recherche et développement. Les premières ne sont pas étalonnées et fournissent donc plutôt une image qu'un thermogramme. Les caméras de maintenance ont une résolution spatiale et thermique adaptée, permettant la localisation de points ou de régions chaudes. Elles sont valables pour des températures relatives et fournissent une température avec une précision de 2 K. Les caméras de mesure fournissent une température absolue, de haute précision mais requièrent pour cela la connaissance des facteurs d'influence.

Les caméras sont caractérisées par la bande spectrale du capteur (voir 2.2 et 3.1). Les températures minimales qui peuvent être observées sont fonction de la longueur d'onde, donc du capteur. Les caméras fonctionnant dans les ondes courtes ( $\lambda < 5 \mu\text{m}$ ), peuvent fonctionner à partir de 270 K et celles fonctionnant en ondes longues ( $\lambda < 12 \mu\text{m}$ ) à partir de 170K. Les variations et donc la sensibilité thermique sera plus importante pour les ondes courtes (voir Figs 4 et 5), mais la plage de fonctionnement des caméras en onde longue sera plus grande. Les caméras fonctionnant en onde courte, ayant des pics d'absorption des gaz dipolaires dans leur bande spectrale, sont sensibles à la concentration. C'est un inconvénient et un avantage, puisqu'elles permettent par exemple de mettre directement des fuites en évidence. Enfin, les caractéristiques spectrales du matériau envisagé devraient également être prises en considération.

Concernant les caractéristiques spatiales, les caméras sont caractérisées par le nombre d'éléments (pixels) et par la fonction de réponse à une fente, placée devant un corps noir à une température différente (FRF). Pour une fente large, la caméra peut distinguer les deux niveaux haut et bas dans et hors de la fente. Lorsque la largeur diminue, à un moment la réponse en température du corps noir se rapproche de celle du cache. La chute relative de température en fonction de la largeur de la fente est une caractéristique spatiale de la caméra. Il y a aussi le pouvoir de résolution spatial (exprimé en radians ou en points par ligne, donné par la FRF de 0,98). Enfin, l'uniformité de l'image d'un objet à température homogène est une donnée importante également.

Pour caractériser les mesures thermiques, le premier paramètre est le calibre de mesure (température minimales et maximales). La sensibilité  $s$  est donnée par la pente de la courbe d'étalonnage :

$$s = V_d / \phi \quad 10$$

avec  $V_d$  la mesure (unité arbitraire). L'exactitude est donnée comme pour tous les capteurs. La résolution est caractérisée par la différence de température équivalente au bruit. Le minimum de flux détectable est donné par la puissance équivalente au bruit (PEB), qui est le rapport du bruit à la sensibilité (en Watts). La détectivité est l'inverse de la PEB. Il existe d'autres paramètres (comme le minimum de température résolue), qui ne devraient être utilisés que pour les imageurs (délivrant une image, non étalonnée).

Finalement, les caractéristiques temporelles sont données par la fréquence d'acquisition, le temps d'intégration, le temps de réponse et la rémanence (la fraction de la réponse précédente qui reste sur l'image suivante).

### 3.4. Étalonnage et mesures

L'étalonnage est généralement de la responsabilité du constructeur. Il est réalisé comme pour la mesure à l'aide des équations 9 à 11, mais cette dernière peut être modifiée pour tenir compte de l'optique. Outre la connaissance de la température de l'objet, choisi comme un corps noir le plus parfait possible (maîtrise de  $\epsilon$ ), observé le plus près possible (minimiser  $\tau_{\text{atm}}$ ), la maîtrise des grandeurs d'influence est évidemment nécessaire, de même que la connaissance des paramètres de



la caméra (comme l'ouverture, le temps d'intégration ou le type de filtre éventuellement utilisé).

Lors des mesures, les grandeurs d'influence doivent le plus souvent être estimées. Certaines, comme la température ambiante ou l'humidité de l'air peuvent être mesurées par la caméra. Les microbolomètres montrent une dérive importante dans le temps et un réajustement est effectué à intervalles réguliers par la caméra, qui peut donc acquérir en temps réel discontinu.

## 4. Thermogrammes

Le thermogramme est une carte de luminance et après conversion, une carte de température. Comme une image, elle représente une projection de l'espace, mais contrairement aux images ordinaires, les données en chaque point (pixel) sont des mesures.

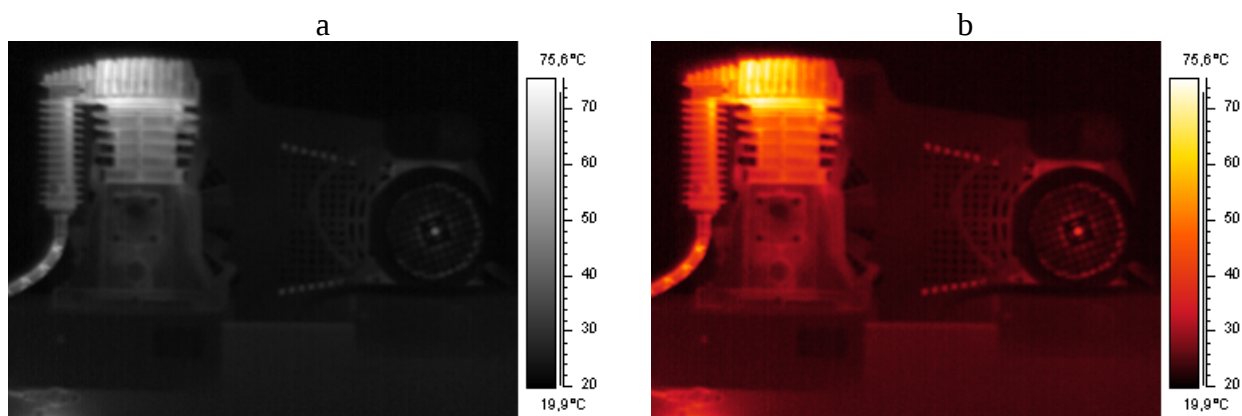
Par rapport aux mesures classiques par thermocouple, bolomètre ou autre, les thermogrammes présentent des avantages. Un grand nombre de mesures (10 à 100 000 mesures) sont réalisées sur un temps très court, couvrant toute la scène de mesure. Hormis quelques cas particuliers, cette mesure n'est pas invasive. Parce que la mesure est réalisée à distance, elle reste possible dans des environnements d'accès malaisé, hostiles (température élevée, présence de rayonnements ionisants, de hautes tensions) ou pour des objets en mouvement (arbres, freins, fours, ...).

Les inconvénients sont d'être une technique plus coûteuse. La grande majorité de l'information acquise est inutile et il faut localiser celle qui est pertinente, soit par un opérateur, soit par logiciel. Enfin, les opérateurs doivent être formés à la technique qui est plus particulière que les capteurs classiques.

### 4.1. Présentation

Par rapport aux images classiques, la résolution spatiale est plus basse. Comme il existe une grande corrélation entre la température de deux points proches, ce n'est pas vraiment un inconvénient. Par contre, la résolution de l'intensité doit être élevée et une mesure numérisée sur huit bits n'est pas performante. Le standard est actuellement de 12 bits (soit 4096 niveaux de discrétisation) par pixel minimum, mais 14 et 16 bits existent aussi.

L'un des avantages du thermogramme étant de permettre de visualiser le comportement thermique de la scène étudiée, il faut une représentation correcte de telles échelles. Les thermogrammes peuvent être représentés en niveau de gris (Fig. 7a), mais dans ce cas, seules 256 nuances peuvent être affichées. De plus, nous ne sommes capables que de percevoir seulement environ 32 niveaux de gris. La solution généralement adoptée est d'utiliser une représentation en échelle de couleurs (Fig. 7b, c et d). Il en existe de nombreuses variantes. Pour permettre une compréhension aisée du thermogramme, une bonne échelle devrait présenter une continuité à la fois dans la teinte et dans la luminance (Fig. 7b et c). L'échelle de type « arc-en-ciel » montrée en 7d n'est pas bonne de ce point de vue mais d'un autre côté cette échelle maximise les contrastes.



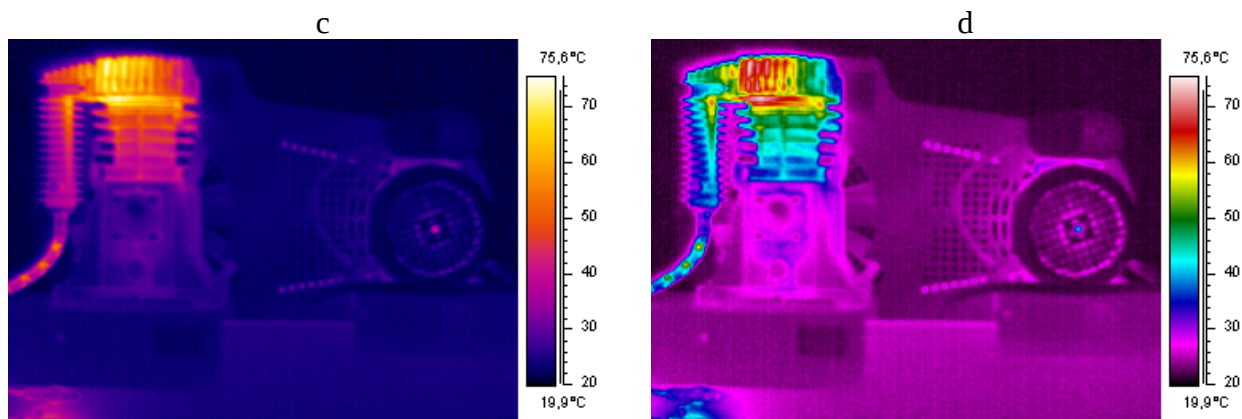


Figure 7 : Représentation d'un thermogramme à l'aide de quatre échelles de couleur différentes.

## 4.2. Traitement et analyse

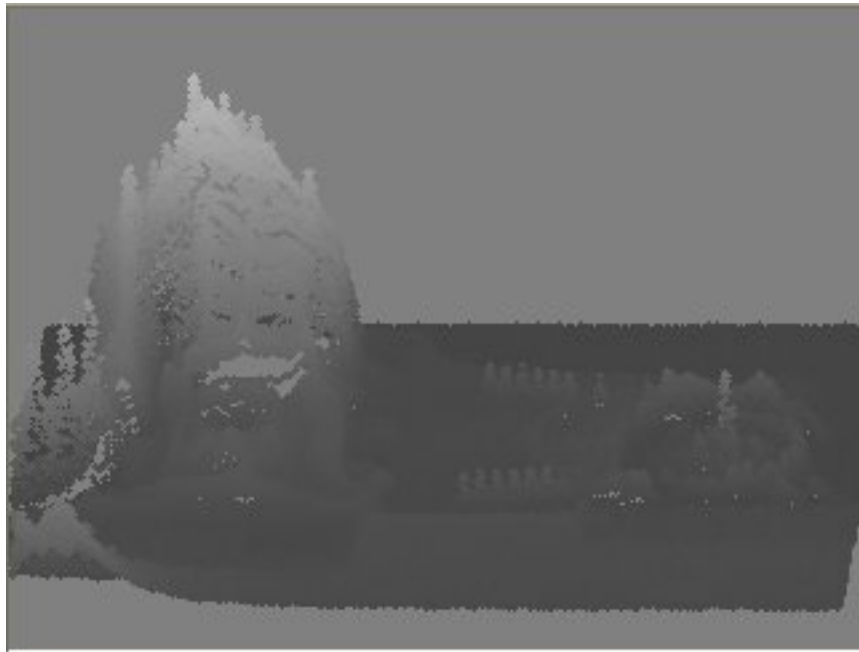
Le traitement a pour but d'éliminer les défauts du thermogramme (le signal), comme le bruit ou les non-uniformités. Le résultat est un thermogramme. L'analyse a pour but d'extraire l'information pertinente, d'obtenir la mesure et les paramètres qui en découlent, l'avertissement en cas de problème, éventuellement une estimation de la durée avant une panne, etc.

Les dégradations géométriques sont de peu d'importance, d'une part parce que la résolution spatiale est relativement basse et d'autre part parce que l'information spatiale n'a généralement qu'une faible importance. Le vignettage peut être compensé par une correction d'arrière-plan, à condition de disposer de l'image d'un objet de température uniforme. Les bruits peuvent être réduits par filtrage. Dans la mesure où ce sont des statistiques de températures sur une région qui sont recherchées, leur intérêt est limité. Il existe des filtres donnant le gradient de température.

Parmi les données pouvant être extraites de l'image, il y a des données ponctuelles, c'est-à-dire la valeur de la température pour un pixel donné. Le plus souvent, ces valeurs seront extraites sur une petite portion de l'image, dénommée région d'intérêt. Sur cette région, peuvent être calculés des paramètres statistiques comme une valeur moyenne ou l'écart-type, des paramètres ordinaux comme les valeurs extrêmes ou l'écart entre les valeurs extrêmes ou ces mêmes paramètres sur le gradient de température. Les températures de deux régions peuvent être comparées (par exemple la température de deux roulements d'un même type, avec des sollicitations semblables). Il est également possible d'extraire un profil de l'image et de rechercher les mêmes paramètres que pour la région d'intérêt. Le dernier type de données concerne le domaine temporel. Les paramètres précédents peuvent être comparés entre deux thermogrammes acquis à des temps différents (proches ou éloignés) ou enregistrés en fonction du temps.

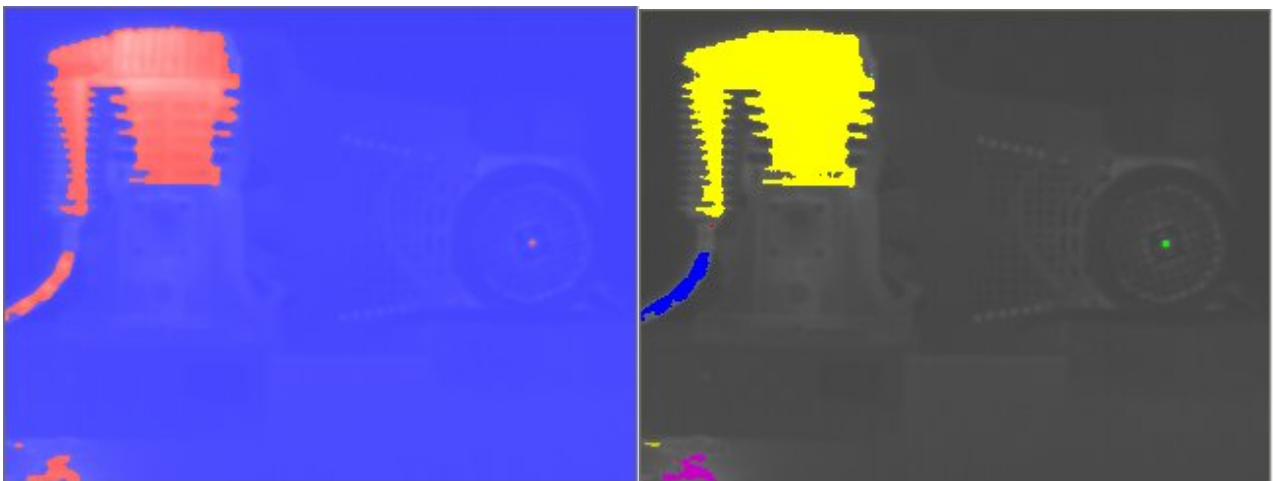
Divers outils utilisés en traitement d'image (et ailleurs) peuvent faciliter la tâche de l'opérateur, voire servir à automatiser une partie du traitement. Les méthodes de corrélation permettent de définir une région d'intérêt à partir d'une image ou d'une portion d'image et de la rechercher ensuite dans une autre image (ou la même image). Cela permet d'effectuer les mêmes calculs « au même endroit », sans que ce soit aux mêmes coordonnées dans l'image, par exemple si la caméra a été déplacée entre les deux acquisitions. Il existe divers algorithmes permettant de localiser les maxima locaux (descente de gradient, flooding, meanshift, ...). Le plus important est sans doute de lisser l'image, soit en pré-traitement, soit au niveau des paramètres de l'algorithme, soit en post-traitement, pour définir une largeur ou un « volume » minimal afin d'éliminer les « bruits » qui peuvent être nombreux, comme montré à la Fig. 8. Mais souvent, le maximum recherché, comme à la Fig. 8 le pic correspondant à l'axe du moteur (à droite), n'est pas beaucoup plus important que d'autres pics qui sont eux clairement du bruit. Séparer ces deux objets requiert soit d'autres

techniques (techniques statistiques dites de reconnaissance de forme), soit l'intervention d'un opérateur.



*Figure 8 : vue en « trois dimensions » de l'image à la Figure 7.*

Une dernière famille de techniques susceptibles d'être utilisées de façon automatique est liée au seuillage de l'image, dont un résultat est montré à la Fig. 9. Les pixels dont la température est au dessus-du seuil et qui se touchent sont groupés pour former des objets, c'est-à-dire une région de l'image sur laquelle il est possible d'effectuer une mesure, comme l'aire ou la température moyenne. Le seuil peut être déterminé par algorithme, pour rechercher les régions chaudes (ou froides) ou être fixé par un opérateur. Cela peut être lié à la plage de fonctionnement normal d'un organe donné de la machine visée. Il est possible de fixer plusieurs seuils (alerte, alarme). Cette technique ne permet pas ou peu de suivre l'évolution de la température. Elle indique simplement que la température est atteinte et sur quelle étendue.



*Figure 8 : Segmentation de l'image de la Figure 7 par seuillage. A gauche, les pixels présentant une température au-dessus du seuil sont rougis et ceux en dessous du seuil sont bleus. A droite, les pixels qui se touchent sont groupés pour former des objets distincts.*

## **5. Applications**

La thermographie infrarouge est utilisée dans divers domaines qui seront présentés rapidement au point 5.1 et pour la maintenance, plus en détail au point 5.2.

### **5.1. Applications diverses**

Historiquement le premier domaine d'utilisation de l'imagerie infrarouge concerne les applications militaires. Il s'agit généralement d'applications de vision et moins de mesure.

Le domaine de la recherche et du développement utilise la thermographie dans de nombreuses applications. Le domaine le plus immédiat est la validation de modèles thermiques. Dans beaucoup de secteurs, l'imagerie thermique est utilisée comme mesure pour optimiser le fonctionnement des prototypes et localiser les zones de génération de chaleur. Parmi ces domaines, citons l'électronique (développement de circuits intégrés), la mécanique, l'électroménager, les industries utilisant la chaleur comme le verre ou l'acier et dans une moindre mesure l'industrie agroalimentaire. Elle est enfin utilisée pour la recherche dans les domaines des sciences naturelles appliquées, comme en médecine, en géologie ou en agronomie.

Ces recherches ont abouti à des applications en contrôle de produits et de procédés de même qu'en maintenance (détaillés au point suivant). Le contrôle des produits est souvent basé sur le réchauffement ou le refroidissement différentiel des zones saines et des zones présentant un défaut. Pour les produits qui défilent, le contrôle peut être effectué par caméras linéaires, soit à la sortie d'une zone chaude (un four), soit après un réchauffement linéaire. Dans d'autres cas, il peut s'agir d'un flash thermique et de l'enregistrement du refroidissement de la surface. Les matériaux composites répondent bien à ce genre de sollicitations. Il est ainsi possible d'y détecter les zones où les différentes couches de tissus n'adhèrent pas correctement. Des fissures peuvent être détectées dans les métaux ou le béton. Pour les bâtiments, les problèmes d'isolation et d'infiltration sont facilement observés en thermographie.

En médecine, la thermographie permet de connaître la température de surface du corps et incidemment d'appréhender le fonctionnement des glandes et organes sous-jacents.

### **5.2. Maintenance**

De la même manière qu'une dégradation des conditions de fonctionnement crée une modification des vibrations engendrées par le fonctionnement d'une machine, cette dégradation se traduit généralement aussi par une augmentation des dégagements de chaleur et donc de la température de surface. Mais le fonctionnement même de la machine peut aussi être à l'origine de variations de température. Il faut donc pouvoir soit définir une plage de fonctionnement « normal », éventuellement pendant « un cycle » (à définir en fonction de la machine) et détecter les écarts par rapport à cet intervalle, soit suivre l'évolution des températures et détecter dans cette évolution une augmentation de la température de fonctionnement. Dans tous les cas, la connaissance de la gamme de température ou du comportement normal est indispensable.

Dans le domaine de l'électricité (et de l'électronique), la thermographie infrarouge est utilisée partout, à la production, au niveau du transport (lignes, disjoncteurs, transformateurs, ...), pour l'inspection des tableaux divisionnaires, ou des bobinages. Ce qui peut être détecté, ce sont les sources d'échauffement, principalement les mauvais contacts aux connexions, aux rupteurs etc. et les court-circuits dans les bobinages (moteurs, transformateurs, ...) et les isolants.

Au niveau des fours (fours à ciment, à chaux, en aciérie, verrerie, fours de craquage en pétrochimie...) et des autres processus faisant appel à la chaleur, la dégradation des réfractaires et des isolants peut être suivie et il est possible de prévoir les interventions au meilleur moment.

Un autre domaine très vaste concerne les fluides. Les fuites peuvent être repérées, soit à cause de

l'échauffement de la matière près de la fuite, soit à cause de la baisse de température liée à la détente d'un gaz. Les gaz n'étant pas transparents dans toutes les longueurs d'ondes, il est aussi possible de détecter certains d'entre eux directement. Une fuite dans une canalisation enterrée et les infiltrations peuvent être repérées. Un autre domaine où la thermographie peut s'avérer efficace concerne l'encrassement des échangeurs thermiques et de leur système de ventilation dans tous les domaines d'application (radiateurs de moteurs thermiques, refroidissement des moteurs électriques, échangeurs de réfrigération, de climatisation etc.). Ceci concerne l'extérieur (le plus souvent en contact avec l'air) et l'intérieur. C'est alors la répartition des températures extérieures qui est l'indice d'une obstruction à l'intérieur d'un radiateur ou d'un conduit de ventilation. Au niveau des fluides, il est possible de connaître le niveau d'un liquide dans un réservoir par thermographie. Enfin, le blocage d'une vanne peut également être mis en évidence.

L'isolation des bâtiments est un domaine où il est possible de détecter les ponts thermiques, le placement ou la dégradation des isolants.

En mécanique, les surchauffes peuvent avoir deux origines, le montage ou les dégradations. Au montage, un défaut d'alignement d'arbres, de poulies ou d'un accouplement peut être repéré. Les augmentations de températures peuvent être consécutives à un manque de lubrifiant, à l'usure ou à un manque de ventilation, pour les freins par exemple. Les dégradations d'origines électriques ou hydrauliques et présentées précédemment (défauts d'isolation des bobinages, obstruction des échangeurs, ...) s'appliquent aussi aux éléments mécaniques comme les moteurs ou les pompes.

## 6. Conclusions

La thermographie infrarouge est une technique spécifique, avec des contraintes liées à la fois aux domaines de l'analyse d'images et de la mesure. La maîtrise des grandeurs d'influence est nécessaire pour les mesures. En maintenance, leur connaissance est utile pour éviter les erreurs d'appréciation. De même, il est nécessaire d'avoir une connaissance de la thermodynamique du sujet étudié. Une formation spécifique des opérateurs est nécessaire.

Cette méthode est performante dans le sens où elle permet d'obtenir rapidement une carte des températures de surface. Elle est non invasive et parce qu'elle est réalisée à distance, peut être appliquée dans des conditions difficiles, en présence de hautes tensions ou pour des objets en mouvement par exemple.

Les domaines d'application sont variés. Cette technique peut certainement être mise en œuvre dans des domaines où la chaleur est utilisée dans le processus (fours) ou comme vecteur (refroidissement). Elle est utilisée également dans des domaines où les dégradations se traduisent par un échauffement (électricité, hydraulique, mécanique).